

Transiente Vorgänge bei Drehstromantrieben

Jordan, Heinz
Stuckmann, Hamid

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 34, 1982,
S.101-109



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Transiente Vorgänge bei Drehstromantrieben

Von **Heinz Jordan** (Düsseldorf) und **Hamid Stuckmann** (Köln)

(eingegangen am 23.6.1982)

Zusammenfassung:

Als transient bezeichnet man diejenigen Vorgänge, die bei Last- und Spannungsänderungen und infolge von beabsichtigten und ungewollten Schalthandlungen geschehen. Sie sind stets mit Drehzahländerungen und Torsionsschwingungen des Antriebs verbunden, die sich u. U. nicht nur störend, sondern sogar zerstörend bemerkbar machen.

Im Vorliegenden wird gezeigt, wie solche Erscheinungen zustandekommen und was man bei der Konstruktion von Elektroantrieben beachten muß, damit man Störungen dieser Art vermeiden kann.

1. Einführung

Die Entwicklung der Elektroantriebe geht bis ins vorige Jahrhundert zurück. Sie ist auch heute noch nicht abgeschlossen. Im allgemeinen denkt man vornehmlich an die automatische Steuerung bzw. Regelung solcher Antriebe mit Hilfe der modernen Elektronik. Es hat sich inzwischen aber gezeigt, daß viele schwere „Pannen“ mit anderen Umständen zu tun haben: nämlich mit der Kopplung der elektromagnetischen und der mechanischen Vorgänge im System Motor–Arbeitsmaschine.

Ein Elektroantrieb besteht im wesentlichen aus einem Motor und einer Arbeitsmaschine, die über Wellenstränge, Kupplungen bzw. Getriebe verbunden sind.

Auf das im Bild 1 dargestellte Schema eines Zweimassensystems lassen sich solche Antriebe letztlich zurückführen. Ein Elektroantrieb ist demnach ein recht einfaches System, dessen physikalisches Verhalten auf den ersten Blick leicht zu durchschauen ist. Kennt man das Motormoment M_m und das Gegenmoment der Last M_a , so genügt es, das Grundgesetz der Mechanik auf die Motor- bzw. die Arbeitsmaschinendrehmasse anzuwenden. Auf diese Weise erhält man den Zeitverlauf der interessierenden Einflußgrößen und damit anschließend auch einen Einblick in die thermischen Vorgänge im Motor. So ist man ursprünglich auch vorgegangen, wenn auch stufenweise.

Anfangs hat man die antreibende Dampfmaschine einfach durch einen Elektromotor gleicher Leistung ersetzt. Es kam ja nur darauf an, die von der Arbeitsmaschine benötigte Leistung sicherzustellen. Das Ganze lief einfach auf die richtige Wahl der Baugröße des Elektromotors hinaus.

Etwas später suchte man das Hochlaufen, Bremsen und Umsteuern sicher zu gestalten. Da kam dann schon die Mechanik ins Spiel, und man machte sich Gedanken

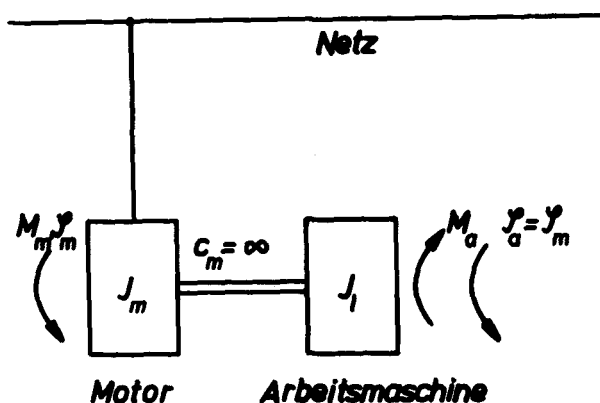


Bild 1:

Mechanisches Prinzipschema eines Elektroantriebs.

über die statische Stabilität der Betriebszustände. An Schwingungen brauchte man wegen der massiven Konstruktion der Antriebs Elemente vorerst nicht zu denken. Dazu kam man erst, als sich die Arbeitsgeschwindigkeiten erhöhten und die Konstruktionen immer leichter wurden. Aber auch da war alles noch relativ einfach zu übersehen.

Man brauchte im allgemeinen nur Resonanzen im Arbeitsbereich zu vermeiden. Man glaubte auch vor nicht allzu langer Zeit, alles mögliche über solche Antriebe zu wissen. Trotzdem kam es hin und wieder zu schweren „Pannen“, die ihre Ursache nicht in einer Fehlkonstruktion der Motoren hatten. Natürlich gibt es auch zuweilen noch solche; insbesondere hinsichtlich der Laufruheerscheinungen [1] und des magnetischen bzw. Lüfterlärms der Motoren.

Die oben erwähnten Störscheinungen waren jedoch ganz anderer Natur! Sie waren darauf zurückzuführen, daß man die Erzeugung der vom Motor entwickelten Drehmomente falsch einschätzte. Das soll im folgenden gezeigt werden.

2. Die Fehleinschätzung der Motordrehmomente

Man übersah, daß das physikalische Verhalten des Antriebsmotors nicht nur von dessen konstruktiven Eigenschaften abhängt, sondern auch ganz wesentlich durch die Antriebsmassen und die Übertragungsglieder bestimmt wird. Hierzu ein überraschendes Beispiel. Bild 2 zeigt die Drehmoment-Drehzahlkennlinien eines 4-poligen 11-kW-Drehstromasynchronmotors mit Einfachkäfigläufer eines sogenannten Normmotors für verschiedene Drehmassen des Läufers.

Erhöht man seine Drehmasse J_n auf das 64-fache (Bild 2a), so sieht man deutlich die transienten Einschwingvorgänge infolge der abklingenden Gleichstromglieder und das, was man von vornherein erwartet und als Drehmoment-Drehzahlkennlinie des Motors bezeichnet.

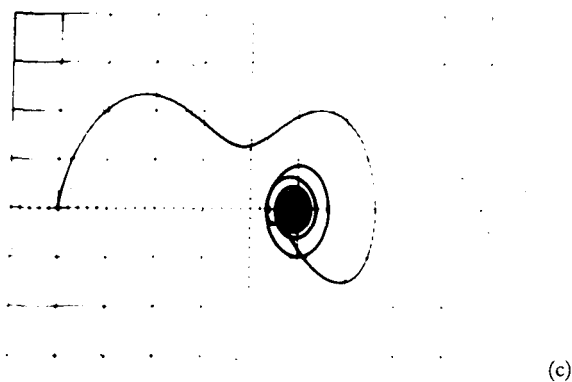
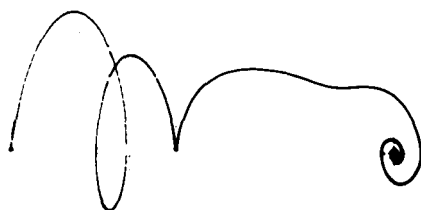
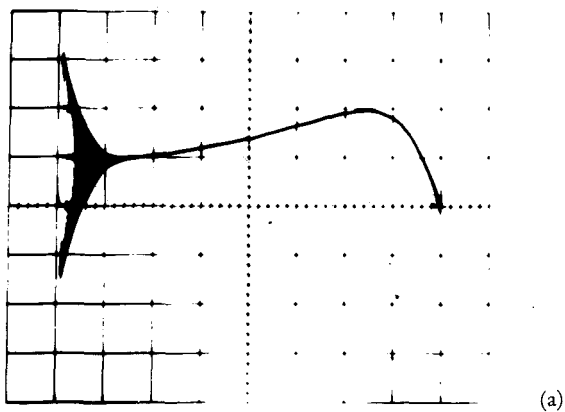


Bild 2:

Drehmoment-Drehzahlennlinie eines 4-poligen 11-kW-Drehstromasynchronmotors

(a) $J = 64 J_n$, (b) $J = J_n$, (c) $J = \frac{1}{3} J_n$.

Aber schon beim Leerhochlauf des ungekuppelten Motors erlebt man eine Überraschung. Der Motor entwickelt offensichtlich Pendelmomente, und ein Kippmoment ist nicht mehr deutlich zu erkennen (Bild 2b).

Noch unverständlicher werden aber die Erscheinungen, wenn man den Motor (mit gleichen elektrischen Daten) so konstruiert, daß seine Drehmasse nur noch $\frac{1}{3} J_n$ beträgt (Bild 2c). Dann macht sich in der Nähe der Leerlaufdrehzahl ein sogenannter Grenzykel bemerkbar (Bild 3). Man kann jeden Motor nachträglich so „frisieren“, daß er die Leerlaufdrehzahl nie erreicht, sondern dauernd um sie herum pendelt.

Man könnte auch der Meinung sein, daß sich ein solcher Grenzykel nur dann ergibt, wenn der Motor vom Stillstand her hochläuft. Er tritt aber auch dann auf, wenn der Motor synchron läuft und kurzzeitig ab- und wieder eingeschaltet wird. Der Betriebspunkt $s=0$ ist eben strukturstabil. So gelangt man zu dem eigentlich naheliegenden Schluß, daß nicht nur der Motor das Verhalten der Arbeitsmaschine, sondern diese gleichzeitig auch das des Motors bestimmt. Daran hat man seltsamerweise bisher nicht gedacht!

So unterscheidet man auch heute noch in Praxis und Lehre Gleichstrom-, Drehstrom- und Synchronmaschinen und schreibt ihnen verschiedene, dem Motor eigene, Drehmomentkennlinien zu, die jeweils nur von den Eigenschaften des betreffenden Motors abhängen und sozusagen zu dessen „Erbmasse“ gehören.

Diese Auffassung ist für den stationären Zustand (konstante Drehzahl) durchaus zutreffend.

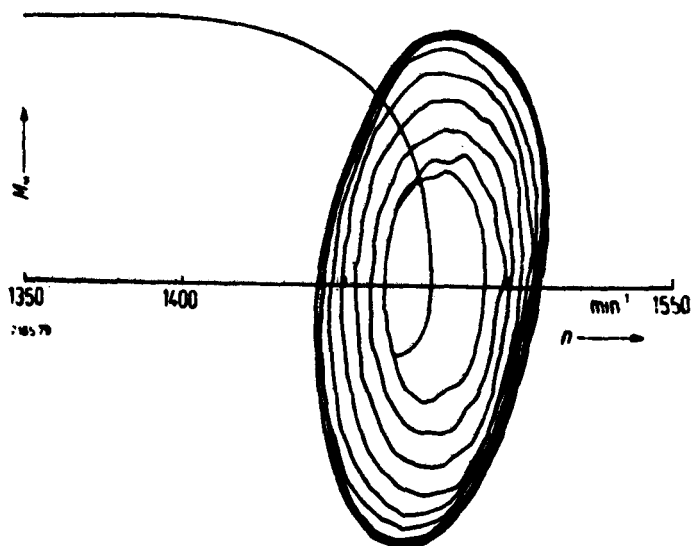


Bild 3:

Experimentell bestimmter Grenzykel eines 4-poligen 7,5-kW-Drehstromasynchronmotors
(Staatl. Forschungsinstitut Brno).

Im transienten Fall, mit dem man es aber häufig zu tun hat, stimmt das keineswegs mehr. Ein Motor verhält sich nicht so, wie er konstruiert ist, sondern wie man ihn „anspricht“. So kann z. B. ein Asynchronmotor synchrone Eigenschaften zeigen, d. h. eine elektromagnetische Drehfederzahl c_e entwickeln, wenn man ihm vonseiten der Arbeitsmaschine her (Kolbenkompressor) Pendelmomente mechanischen Ursprungs aufzwingt [2]. Das hat man erst ziemlich spät festgestellt. Natürlich spielt auch die Konstruktion eine Rolle, aber eine ganz andere, als man bisher annahm. So wird z. B. ein widerstandsloser Asynchronmotor (Supraleitung) wie eine Synchronmaschine wirken. Bild 4 zeigt seine „Nadelkennlinie“. Der widerstandslose Motor kann sich nur so verhalten, weil die Flußverkettung des Läufers nach dem Induktionsgesetz konstant bleiben muß [3]. Noch unverständlicher ist aber, daß ein solcher Motor überhaupt anlaufen kann, und zwar bis zur doppelten synchronen Drehzahl, obwohl anfangs sein elektromagnetisch erzeugtes Anzugmoment verschwindet. Wieso das möglich ist, wird in [3] nachgewiesen. Man braucht nur die Anfangsbedingungen unwesentlich zu ändern, um das zu erreichen.

Auch heute noch hin und wieder auftretende unerklärliche „Störungen“ sind auf Unkenntnis bezüglich der Motordrehmomente zurückzuführen.

3. Über die Ursachen der Fehlinterpretation der Motormomente

Die Fehlinterpretation der Motormomente kommt dadurch zustande, daß man bei allen transienten Vorgängen stets voraussetzt, die Drehzahl (d. h. die momentane Winkelgeschwindigkeit φ_m des Läufers) könne wegen der großen Drehmassen prak-

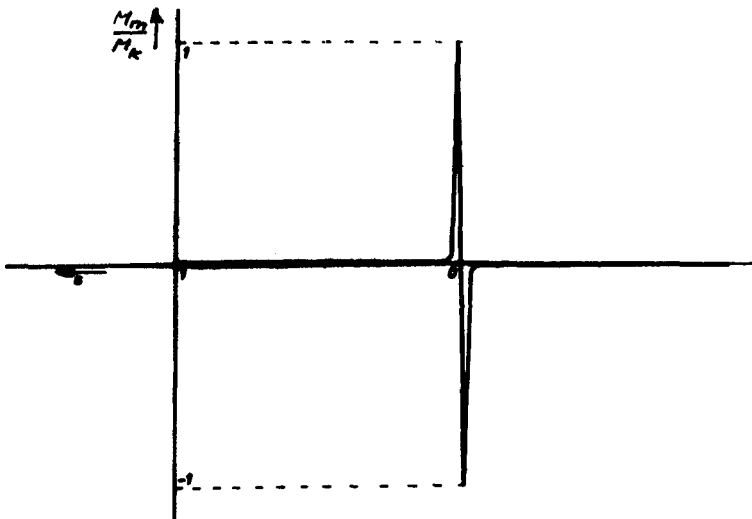


Bild 4:

Synchrone Nadelkennlinie eines widerstandslosen Drehstromasynchronmotors.

tisch als konstant angesehen werden. Dafür hat man allerdings gute Gründe, denn nach den sogenannten Wachstumsgesetzen wächst das Motormoment M_m mit der 4. Potenz, die Drehmasse J jedoch mit der 5. Potenz der linearen Abmessungen. Man ist also geneigt, die winzigen Drehzahländerungen als unerheblich für den zeitlichen Ablauf der physikalischen Vorgänge anzusehen. Das ist nun aber falsch; denn dadurch wird die Entkopplung der elektromagnetischen und der mechanischen Vorgänge bewirkt. In Wirklichkeit liegen die Dinge anders. Es zeigt sich nämlich, daß die Spannungsdifferentialgleichungen die momentane Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_m$ als zeitveränderlichen Parameter aufweisen; oder anders ausgedrückt: es handelt sich um ein kompliziertes System von Differentialgleichungen mit zeitveränderlichen Koeffizienten, das nur numerisch lösbar und überdies noch nichtlinear ist.

Man kann daher weder die Ströme noch das Motordrehmoment berechnen, es sei denn, daß man den Zeitverlauf von $\dot{\varphi}_m$ kennt. Dieser ergibt sich aber erst unter Heranziehung der Bewegungsdifferentialgleichungen.

Die elektromagnetischen Spannungsdifferentialgleichungen und die mechanischen Bewegungsdifferentialgleichungen sind über das Motordrehmoment eng miteinander gekoppelt. Daraus folgt, daß bei transienten Vorgängen das ganze System der beschreibenden Differentialgleichungen gemeinsam gelöst werden muß. Die Ströme und das Motordrehmoment erweisen sich dann als Funktionen der Zeit und nicht von $\dot{\varphi}_m$ bzw. irgend eines Drehwinkels. Man sieht gleichzeitig, daß im transienten Bereich in physikalischer Hinsicht keine prinzipiellen Unterschiede zwischen Asynchron- und Synchronmaschinen existieren. Die konstruktiven Verschiedenheiten dieser beiden Motorarten schlagen physikalisch nicht zu Buche.

Weitere Fehlinterpretationen rühren daher, daß man bei transienten Vorgängen nur an erzwungene Torsionsschwingungen denkt und die Anfachung von freien oder,

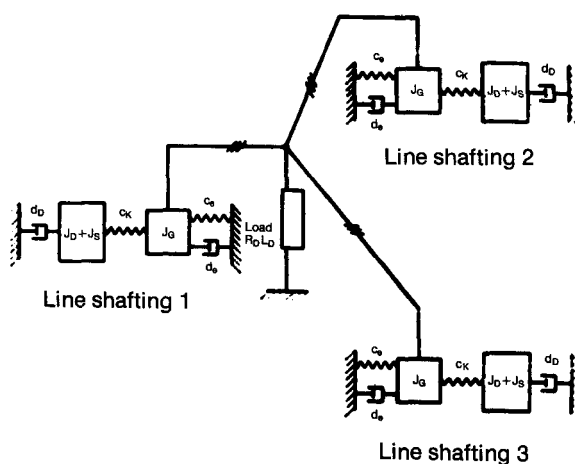


Bild 5:

Schwingungstechnisches Ersatzschema eines Bordnetzes aus drei gleichen Wellensträngen.

wie man auch sagt, Eigenschwingungen übersieht. Der Grund hierfür ist vermutlich der, daß die Frequenz der Eigenschwingungen im Resonanzfall genau derjenigen der erzwungenen Pendelmomente (doppelte Schlupffrequenz) entspricht. Bei etwas genauem Studium erkennt man aber sofort, daß die Frequenz der Torsionsschwingungen andauernd erhalten bleibt.

Wären erzwungene Schwingungen die Ursache, so müßte sich diese Frequenz mit der Drehzahl (bzw. dem Schlupf) in bestimmter Weise ändern. Die Vorgänge lassen sich durch ein sogenanntes Duhamelsches Integral beschreiben und führen dazu, die Spannungsdifferentialgleichungen näher zu untersuchen. Da sich im Luftspalt des Motors alles sowohl zeitlich als auch räumlich periodisch ändert, wird man auf Lösungsansätze in „Wellenform“ geführt. Auf diese Weise lassen sich dann eine ganze Anzahl von bisher unerklärlichen Erscheinungen zwanglos deuten. In diesem Zusammenhang sei auf einschlägige Literatur [4], [5] verwiesen.

Zwei typische Beispiele sollen den Tatbestand veranschaulichen.

a) Selbsterregungserscheinungen beim Inselbetrieb von Synchronmaschinen [6]

Von jeher bekannt ist, daß am starren Drehstromnetz hängende Synchronmaschinen selbsterregte Torsionsschwingungen ausführen oder „pendeln“ können, ferner aber auch, daß im Inselbetrieb, d.h. ohne Anschluß an ein taktgebendes Drehstromnetz, wie er z.B. in den Bordnetzen von Schiffen die Regel ist (Bild 5), so etwas nicht möglich sein sollte.

Nach der klassischen Theorie der Synchronmaschinen fehlt dann ein jeglicher Anlaß zu Drehschwingungen, weil ohne Anbindung an ein taktgebendes Netz die Drehfederzahl (d.h. der potentielle Energiespeicher) fehlt. Weiterhin sollte eine Dämpferwicklung nutzlos sein, weil beim Pendeln die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Drehfeld der Pendelströme im Ständer und dem Polrad dauernd verschwindet. Bei richtiger Anwendung der Spannungsdifferentialgleichungen wird man aber dazu geführt, daß auch im Inselbetrieb sowohl selbsterregte Pendelungen in ganz bestimmten Lastbereichen möglich sind, als auch, daß diese durch passend bemessene Dämpferwicklungen unterdrückt werden können. Auch das hat man erst relativ spät bemerkt.

b) Getriebeüberlastungen beim Antrieb von Turbokompressoren [7]

Bei solchen Antrieben werden aus Wirkungsgradgründen normalerweise Getriebe zwischen Motor und Arbeitsmaschine vorgesehen. Es ist dabei üblich, diese Getriebe für 6-fache Sicherheit (d.h. 6-faches Nennmoment) auszulegen. Einfache Überlegungen zeigen, daß eine derartige Sicherheit eigentlich ausreichen sollte. Trotzdem ist es hin und wieder zu Gewaltbrüchen („Getriebesalat“) gekommen (Bild 6). Hierbei ist offenbar die Anfachung von freien Torsionsschwingungen beim Durchfahren der torsionskritischen Drehzahlen falsch beurteilt worden.

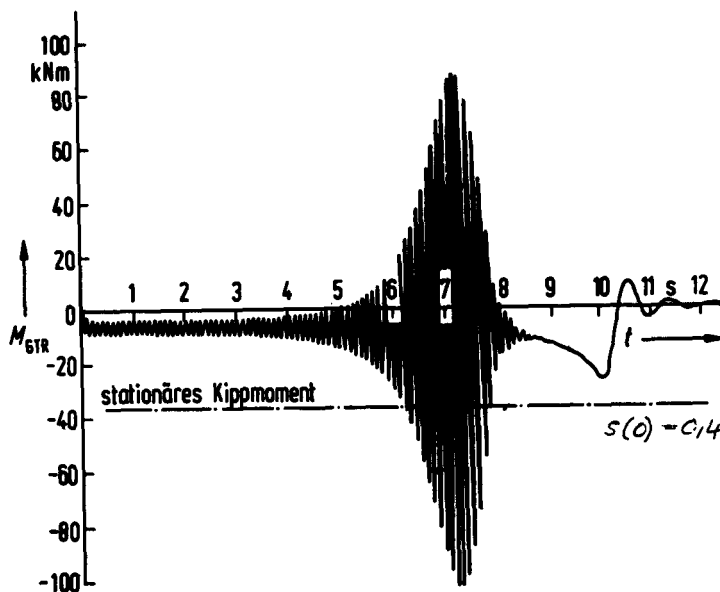


Bild 6:

Zeitverlauf des vom Getriebe zu übertragenden Drehmoments

(Experimentelle Aufnahme aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der Universität Hannover).

Mit dem physikalischen Aspekt der Erscheinungen ist ein umfangreicher mathematischer Aufwand verbunden, insbesondere im Hinblick auf damit verbundene Stabilitätsbedingungen [8], [9]. Auch bei diesen darf die Kopplung elektromagnetischer und mechanischer Vorgänge nicht außer acht gelassen werden, vor allem bei den sogenannten Laufruheerscheinungen. Hier kommt nämlich der Umstand dazu, daß die Torsionsschwingungen mit den Biegeschwingungen „gekoppelt“ sind [1].

Die Nichtbeachtung der Kopplung zwischen elektromagnetischen und mechanischen Vorgängen verschiedener Art ist es, die zu Fehlbeurteilungen führt.

Literaturhinweise

- [1] J. FRÜCHTENICHT, H. JORDAN, H. O. SEINSCH: „Über elektromagnetische Ursachen von Laufruhestörungen in Antrieben mit Induktionsmotoren“, Abhandl. Braunsch. Wiss. Gesellsch. XXXI (1980), 57–72.
- [2] H. JORDAN, H. W. LORENZEN, T. TAEGEN: „Erzwungene Pendelungen von Asynchronmaschinen“, ETZ-A (1963), 645–648.
- [3] A. ČUPSA, W. GEYSEN, H. JORDAN, H. WALCARIUS: „Stationäre und transiente Vorgänge in elektrischen Maschinen“, Elektrotechnicky Časopis, Ročník 28, Číslo 10 (1977), 705 ff.

- [4] H. JORDAN, T.S. KULIG, H.O. SEINSCH: „Berechnung elektromagnetischer und mechanischer Ausgleichsvorgänge bei Antrieben mit Synchronmaschinen“, (1. Teil: Spannungsdifferentialgleichungen und elektromagnetische Drehmomente), Siemens Forsch.- u. Entwickl.-Ber. **10** (1981), Nr. 5, 303–310.
- [5] H. JORDAN, T.S. KULIG, H.O. SEINSCH: „Berechnung elektromagnetischer und mechanischer Ausgleichsvorgänge bei Antrieben mit Synchronmaschinen“, (2. Teil: Darstellung der Einflußgrößen durch die bekannten Maschinendaten), Siemens-Forsch.- u. Entwickl.-Ber. **11** (1982), Nr. 1, 1–7.
- [6] W. GEYSEN, H. JORDAN, K. KOVÁCS, K. v. SOÓS, A. VANDENPUT: „Anfachung von Drehschwingungen bei Drehstrommaschinen“, Wiss. Ber. AEG-Telefunken **51** (1978), 2/3, 135–144.
- [7] H. JORDAN, M. MÜLLER, H.O. SEINSCH: „Über das Verhalten von Drehstrom-Asynchronmotoren in drehelastischen Antrieben“, Wiss. Ber. AEG-Telefunken **53** (1980), 102–110.
- [8] K. v. SOÓS: „Stabilitätsuntersuchungen bei transienten Vorgängen in Drehstrommaschinen“, Diss. Gesamthochschule Duisburg 1978.
- [9] W. GEYSEN, H. JORDAN, W. LOHAUS, K. v. SOÓS, A. VANDENPUT, H. WALCARIUS: „Disturbances in the behavior of alternating-current machines by selfexcited electromagnetic phenomena“, E.P.A. June (1979), Vol. 2, Nr. 3, 81–86.